

文章编号: 1005-0523(2025)05-0049-09



采用三维土压力盒测定土体应力的砂土试验标定分析

蔡仙发¹, 朱怀龙^{2,3,4}, 刘银芳¹, 周建树¹, 朱碧堂^{2,3,4}, 刘俊杰^{2,3,4}

(1. 福建岩土工程勘察研究院有限公司, 福建 福州 350108; 2. 华东交通大学土木建筑学院, 江西 南昌 330013;

3. 华东交通大学江西省地下空间技术开发工程研究中心, 江西 南昌 330013; 4. 华东交通大学山区土木工程安全与韧性全国重点实验室, 江西 南昌 330013)

摘要: 文章介绍了一种三维土压力盒的砂土标定方法, 基于定制的三维土压力盒标定筒, 通过标定试验研究标定筒大小、三维土压力盒基座尺寸、量程和埋深等因素对三维土压力盒砂标系数的影响以及加卸载条件下三维土压力盒的砂标特性。结果表明: ① 标定筒的尺寸和埋设深度对标定结果有较大影响, 而同一量程三维土压力盒, 基座尺寸和传感器径厚比对标定结果影响较小; ② 大量程的三维土压力盒滞后效应比小量程的三维土压力盒小, 应优先选择大量程三维土压力盒进行土体应力测试; ③ 三维土压力盒的卸载曲线可采用卸载前最大的应力和输出电压值进行归一化处理, 量程为 3.0 MPa 的三维土压力盒的归一化卸载曲线弯曲度小、不同卸载曲线分布带宽小, 可采用指数曲线进行拟合, 并用于土体应力的测试分析。

关键词: 土体应力测试; 三维土压力盒; 薄膜压力传感器; 砂土标定; 滞后效应

中图分类号: TP212

文献标志码: A

本文引用格式: 蔡仙发, 朱怀龙, 刘银芳, 等. 采用三维土压力盒测定土体应力的砂土试验标定分析[J]. 华东交通大学学报, 2025, 42(5): 49-57.

Calibration Analysis of 3D Earth Pressure Cells in Sand for Soil Stress Measurement

Cai Xianfa¹, Zhu Huailong^{2,3,4}, Liu Yinfang¹, Zhou Jianshu¹, Zhu Bitang^{2,3,4}, Liu Junjie^{2,3,4}

(1. Fujian Research Institute of Geotechnical Engineering Investigation, Fuzhou 350001, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 3. Engineering Research & Development Centre for Underground Technology of Jiangxi Province, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 4. State Key Laboratory of Safety and Resilience of Civil Engineering in Mountain Area, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: In this paper, a calibration method for the 3D earth pressure cell in sand is introduced. Using two customized calibration cylinders, the influence of the calibration cylinder size, the box size of the earth pressure cells, the capacity and the buried depth on the calibration coefficient of the 3D earth pressure cells in sand and the sand characteristics of the 3D earth pressure cell involving loading and unloading are studied. The results show that: ① The size of the calibration cylinder and the depth of burial have a large impact on the calibration results, whereas for the same range of 3D earth pressure cell, the size of the base and the transducer diameter-to-thickness ratio have a smaller impact on the calibration results; ② The hysteresis of the large capacity 3D earth pressure cell is smaller than that of the small capacity cells, and the large capacity cells should be preferentially

收稿日期: 2024-09-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(52020105003); 中国冶金地质总局科研项目(CMGBK202102)

selected for soil stress measurement. ③ The unloading curve of the 3D earth pressure cell can be normalized by the maximum stress and output voltage value before unloading, and the normalized unloading curves of the 3.0 MPa cell has a small distribution bandwidth for different unloading curves, and the exponential curve can be used for analysis of soil stress measurement.

Key words: soil stress measurement; 3D earth pressure cell; diaphragm pressure sensors; calibration in sand; hysteresis effect

Citation format: CAI X F, ZHU H L, LIU Y F, et al. Calibration analysis of 3D earth pressure cells in sand for soil stress measurement[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2025, 42(5): 49–57.

土体应力测试是岩土工程中的难点,特别是加卸载条件下的土体应力测试。目前,土体应力测试多采用薄膜式三维土压力盒^[1-3],一般仅能测得垂直于其薄膜面的法向应力,无法得到某一点的三向应力状态,同时在卸载条件下薄膜三维土压力盒存在显著的土拱,导致土压力的标定系数与气压或水压标定系数显著不同^[4-8]。

李顺群课题组^[9-12]设计了一种能够测定土中6个方向正应力的三维土压力测试装置。该三维土压力盒由一个开槽的十二面体基座和7个常规三维土压力盒(1个为备用正应力)组成,根据任一方向上正应力与常规应力表示方法6个分量之间的关系,建立起三维土压力盒测试数据与常规应力表示方法之间的转换矩阵,从而得出三维应力状态。尽管该三维土压力盒已应用于原位路基碾压试验^[13-14],但其测定的土压力准确性值得商榷,因为其采用的三维土压力盒标定系数 K 为室内气压或水压标定,与实际工程中的土体测试环境有很大差异^[4-7]。Zhu等^[4]针对打桩过程中存在反复加卸载情况,提出需要将薄膜三维土压力盒在土体中进行加卸载标定,才能准确测定打桩过程中的土体应力场。

本文基于定制的不同尺寸三维土压力盒标定筒,对不同基座大小、不同量程的薄膜三维土压力盒进行标定试验,分析标定筒尺寸、基座等对不同量程三维土压力盒的影响规律,从而建议合理的基座尺寸、选取土体应力测定的薄膜三维土压力盒量程。

1 三维土压力盒砂土标定

1.1 三维土压力盒与数据采集

三维土压力盒测定7个方向的土体正应力,其中1个为备用正应力,其局部三维坐标系如图1所

示, z 方向垂直于二维码向外。为论述方便,现将7个方向正应力测试单元命名为 a 、 b 、 c 、 d 、 e 、 f 、 π 面。其中, a 、 b 、 c 、 d 在斜面上, e 和 f 在侧边, π 在二维码背面。

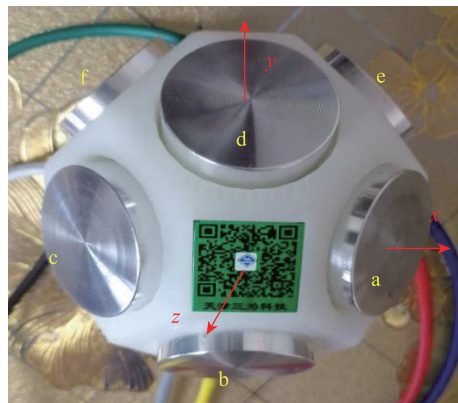


图1 三维土压力盒坐标系和测试单元编号

Fig. 1 Coordination and plane numbering of a 3D earth pressure cell

标定试验测定单元输出的电压是通过东华测试数据采集系统进行采集。在正应力采集过程中,7个测试单元分别由7根不同颜色的电缆与应力应变测试分析系统相连,每根电缆由黄、黑、白、红共4根导线组成。将采集得到的电压值乘以标定系数,即可得到各测试单元测定的土体正应力。

由于每个三维土压力盒安装的7个薄膜式传感器量程相同,本文标定只对 π 面的应力传感器进行标定讨论, π 面与加卸载方向一致。标定分析的三维土压力盒(编号分别为A、B、C和D)及其厂家提供的水压标定系数如表1所示。三维土压力盒A、B、C量程均为1.0 MPa;三维土压力盒D量程为3.0 MPa。

1.2 砂土标定装置和标定试验过程

标定试验装置示意图如图2所示,采用自制的标定筒,考虑标定筒尺寸的影响^[15],本文设计制作

表1 砂标三维土压力盒参数表
Tab.1 3D earth pressure cell for calibration

项目	参数	A	B	C	D
尺寸	基座/mm	50	50	80	50
	直径/mm	19	19	27	19
	厚度/mm	8	8	9	8
测试单元编号及水压标定系数	a	227.3	261.6	304.6	649.5
	b	214.9	247.4	300.8	634.8
	c	247.1	252.5	303.9	616.5
	d	246.4	251.4	325.9	616.1
	e	258.8	244.2	311.9	613.1
	f	255.8	253.6	310.7	637.6
	π	236.2	244.6	328.1	633.8

了内径325 mm、高350 mm(小筒),和内径500 mm、高550 mm(大筒)两个标定试验筒。标定筒基座由底板、三脚撑和圆形板组成,三者焊接在一起滑入圆形标定筒内,形成标定筒基座。基座的圆形板上有8个预留孔,保证测试元件的电缆能通过预留孔。 H 为三维土压力盒离加载板的距离, D_b 为加载板的直径。

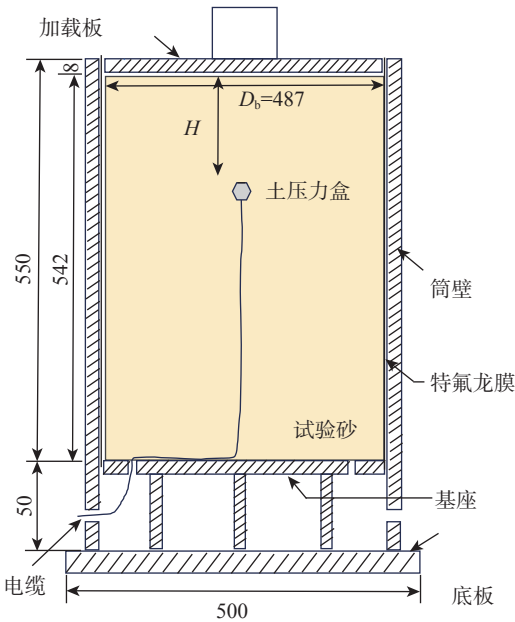


图2 标定试验示意图(单位:mm)
Fig. 2 Photograph of the calibration test (Unit: mm)

标定筒底部侧壁预留两个20 mm直径预留孔。三维土压力盒电缆线从圆形板预留孔、筒壁预留孔通过后与数据采集系统连接。当把三维土压力盒固定在基座上、缆线穿过圆形板预留孔后,采用绝缘胶密封圆形板预留孔以及圆形板与标定筒

内壁缝隙。

标定荷载采用SUNS电子万能试验机以荷载控制的方式进行加载,荷载分级施加,每级荷载持续2 min。加载系统由加载板和夹具组成,为了减少加载过程中冲击荷载对试验结果的影响,加载板由两块钢板组成,两层钢板间设置柔性橡胶垫,试验机施加的集中荷载通过加载板转变为均布力施加于砂层表面。加载板与圆形筒壁之间预留6.5 mm间隙,保证加载时不与圆筒侧壁接触。

筒内底部焊接一个带孔圆形底板,在圆形板中部设置三脚撑与底板连接,在试样筒底部侧壁预留2个直径为20 mm孔,三维土压力盒缆线可从圆形底板和侧壁预留孔穿出后与采集系统连接。

标定筒采用的试验砂进行分层摊铺,每层30 mm,并锤击至预设的土体密度。

为考察三维土压力盒埋置深度对标定系数的影响,三维土压力盒的埋置深度从65 mm到400 mm。在确定埋深对标定结果影响可忽略条件下,变换其他标定试验条件,标定试验步骤共6步。

1) 试验准备。整理三维土压力盒电缆,通过基座的圆形板和圆筒的预留孔与数据采集仪连接,并密封预留孔及圆形板四周,调试电脑上的应变采集软件。

2) 标定筒减阻措施。为了减少试验砂与圆筒内壁之间的摩擦,在圆筒内壁涂抹石墨粉,减小由于砂土和筒壁间摩擦力引起的荷载损失,并在容器内铺设一层特氟龙膜。

3) 试验砂分层填铺和三维土压力盒放置。在标定筒内按每层厚30 mm、分层铺设试验砂,土压传感器和周围砂土介质之间由于刚度不匹配易产生应力集中问题,为减小这种效应引起的测量误差,将底部试验砂充分夯实至设计密度。当分层填铺到三维土压力盒放置高度时,安放三维土压力盒,并用水平仪检测三维土压力盒确保压力盒水平放置,然后再继续分层填铺试验砂至筒顶。试验中控制砂的填铺密度为1.78 g/cm³,相对密度约为70%。

4) 预加载。用加载系统通过加载板施加预压力,预压10 min后卸载,调试数据采集设备、读取初值后开始分级加载,再次用水平仪检测加载板的水平度,再依次按直径由大到小放置承压板,使得荷载能均匀传递到筒内。

5) 加卸载标定。调试加载系统和数据采集系统,准备完毕后开始加卸载。为了反映加卸载效应,标定时加载系统采用往复加卸载,总共分6级

加载,加卸载速率为 60 kPa/min。对于不同量程的三维土压力盒,施加的荷载曲线如图 3 所示。 σ 为当前加载应力, t 为加载时间。每加载一级,荷载维持 2 min,再卸载,逐级加卸载,直至试验结束。

6) 记录并整理数据。在加载过程中,采用静态应变测试仪采集电压值,当每级荷载下电压值稳定后再读取当前荷载下的电压值。

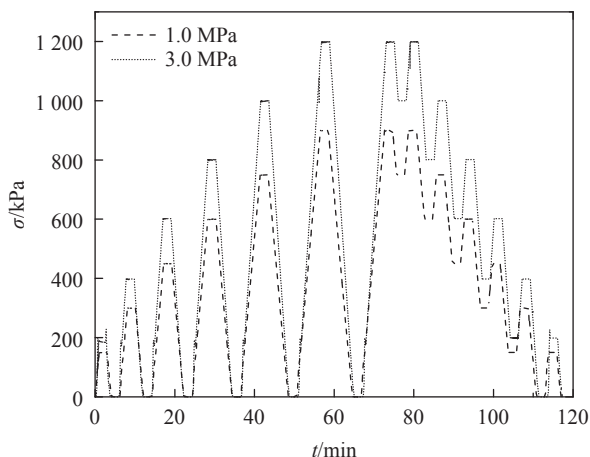


图 3 不同量程三维土压力盒加载过程
Fig. 3 Loading process of 3D soil pressure cells with different ranges

1.3 砂土标定试验方案

本文除了考察三维土压力盒在测试土体应力的可靠性和量程选择外,还需要考虑标定筒尺寸、压力盒埋置深度以及加卸载方式对三维土压力盒标定结果的影响。为此,设计了如表 2 所示的试验方案。

表 2 三维土压力盒标定试验加载方案

方案	三维土压力盒	埋深/mm	试验特征	试验目的
1	A	65~400	不同尺寸标定筒和三维土压力盒埋深	评估标定筒尺寸和三维土压力盒埋深对三维土压力盒标定系数的影响
2	B、C	300	不同基座尺寸和传感器厚径比	研究基座尺寸和三维土压力盒厚度(传感器刚度)效应
3	B、D	300	不同量程三维土压力盒和反复加卸载	土压力测试的量程选择和卸载土拱效应分析

方案 1: 选用三维土压力盒 A, 量程为 1.0 MPa 的三维土压力盒, 分别采用 500, 325 mm 内径的标定筒,

开展三维土压力盒不同埋深 $H=0.2D_b, 0.4D_b, 0.6D_b, 0.8D_b$ 下的标定试验。根据不同埋深条件下同一三维土压力盒的标定结果, 确定合理的标定筒尺寸, 讨论埋深对砂标结果的影响, 确定合理的标定埋深。

方案 2: 选用三维土压力盒 B 和 C, 量程均为 1.0 MPa, 但基座尺寸分别为 50, 80 mm, 压力传感器的直径分别为 19, 27 mm, 采用 500 mm 内径的标定筒, 开展不同尺寸三维土压力盒的标定试验。根据加卸载标定结果, 讨论基座尺寸、土压传感器径厚比的影响, 为基座和土压传感器的尺寸选择提供依据。

方案 3: 选用三维土压力盒 B 和 D, 量程分别为 1.0, 3.0 MPa 的三维土压力盒, 采用 500 mm 内径的标定筒, 开展不同量程三维土压力盒在埋深 300 mm 的标定试验。根据卸载阶段的标定结果, 讨论不同量程三维土压力盒的土拱效应, 为现场土体应力测定选取合理的三维土压力盒量程。

2 标定试验结果分析

2.1 标定筒尺寸和三维土压力盒埋深效应

为考察标定筒尺寸和三维土压力盒埋深对三维土压力盒标定结果的影响, 选用表 1 中的三维土压力盒 A, 采用两个不同尺寸标定筒开展了标定试验, 三维土压力盒的埋置深度 $H=65\sim 400$ mm。图 4 和图 5 分别为采用大筒和小筒得到的标定曲线, u 为当前输出电压, σ 的表达式为求加载应力标定系数的常用方法。

1) 无论大筒还是小筒、 π 面还是 e 面, 在加载段, 荷载与输出电压近似呈线性关系, 但卸载阶段出现明显的滞回环。这是薄膜式土压力传感器表现出的土拱效应或三维土压力盒-砂土相互作用效应。

2) 无论大筒还是小筒、 π 面还是 e 面, 三维土压力盒的砂标系数在埋深超过 260~300 mm ($13\sim 15d_s$) 后趋于稳定 (d_s 为直径为 19 mm 的压力传感器), 表明在埋深超过 $15d_s$ 后, 埋置深度对三维土压力盒的标定结果影响很小, 不受加载边界影响, 标定曲线斜率可作为三维土压力盒在土体中的真实标定系数。并且稳定后的砂标系数远大于三维土压力盒的水压标定系数, 如 π 面和 e 面稳定后的砂标系数分别为 422.41, 421.16 kPa/mV, 是水压标定系数 (236.00 kPa/mV) 的 1.79 倍和 1.78 倍;

3) 当埋深不大于 100 mm 时, 无论大筒还是小筒、 π 面还是 e 面, 三维土压力盒的砂标系数接近水压标定系数, 表明三维土压力盒接近加载板, 砂土

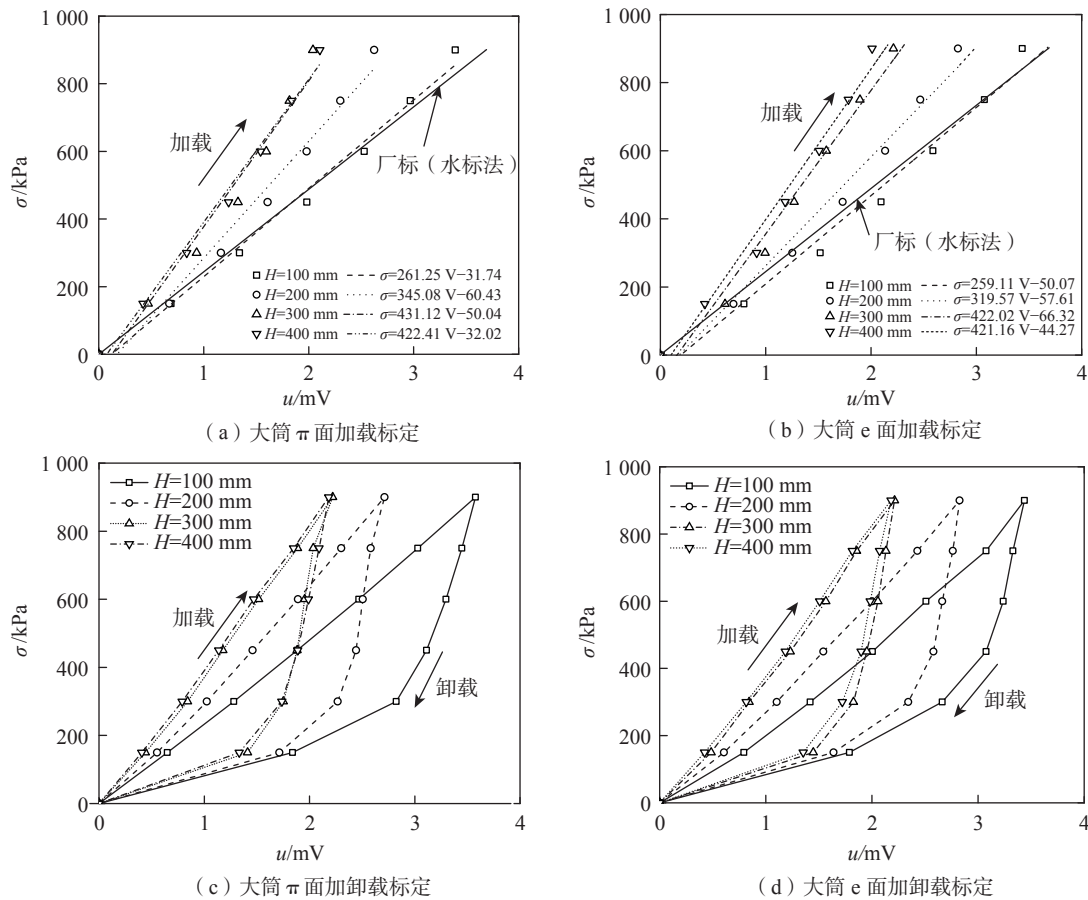


图4 三维土压力盒A大筒标定曲线

Fig. 4 Calibration curve of 3D earth pressure cell A with big cylinder

与三维土压力盒的相互作用效应降低。理想条件下,当三维土压力盒与加载板接触时,标定系数应与厂标提供的水压标定系数一致。

4) 当埋置深度不大于100 mm时,小筒的砂标系数偏离水压标定系数要比大筒的砂标系数大。如在埋深为65 mm时,测试单元 π 面小筒的砂标系数为281.01 kPa/mV,是水压标定系数的1.2倍,而测试单元 π 面在埋深为100 mm的大筒砂标系数为261 kPa/mV,是水压标定系数的1.1倍,因此,采用大筒标定比小筒标定要更准确。无说明情况下,下面均采用500 mm直径的大筒进行标定。

5) 对比两种不同尺寸标定筒得到的三维土压力盒加卸载标定曲线可见,采用大筒标定时加卸载曲线形成的滞回环要小于小筒,小筒尺寸将影响砂土拱效应或砂土与三维土压力盒相互作用效应。在埋深较小(65~195 mm)时,小筒的滞回现象更为明显。

2.2 三维土压力盒基座尺寸

为考察三维土压力盒基座大小、传感器直径对三维土压力盒标定结果的影响,选用表1中量程均为

1.0 MPa的三维土压力盒B和C进行大筒标定试验。三维土压力盒B和C的基座大小分别为50,80 mm;传感器直径分别为19,27 mm;厚度分别为8,9 mm;对应的径厚比分别为2.4,3.0; π 面水压标定系数分别为244.60,328.10 kPa/mV。

图6为三维土压力盒B和C的 π 面大筒标定试验曲线。

1) 两种不同基座尺寸和传感器径厚比的三维土压力盒在不同深度下的加载标定曲线其变化规律基本一致。在深度为100 mm时,加载砂标系数接近水压标定系数。在埋深达到300 mm(11~15 d_s)以后,加载砂标系数趋于稳定。

2) 三维土压力盒B和C在埋深为100 mm时的砂标系数分别为261.20,335.70 kPa/mV,为水压标定系数的1.06倍和1.02倍。这表明大尺寸基座和大径厚比传感器或大刚度(高标定系数)的三维土压力盒测定的结果更为准确。

3) 两种不同基座和传感器径厚比尺寸的三维土压力盒加卸载标定曲线基本一致,滞回环的大小

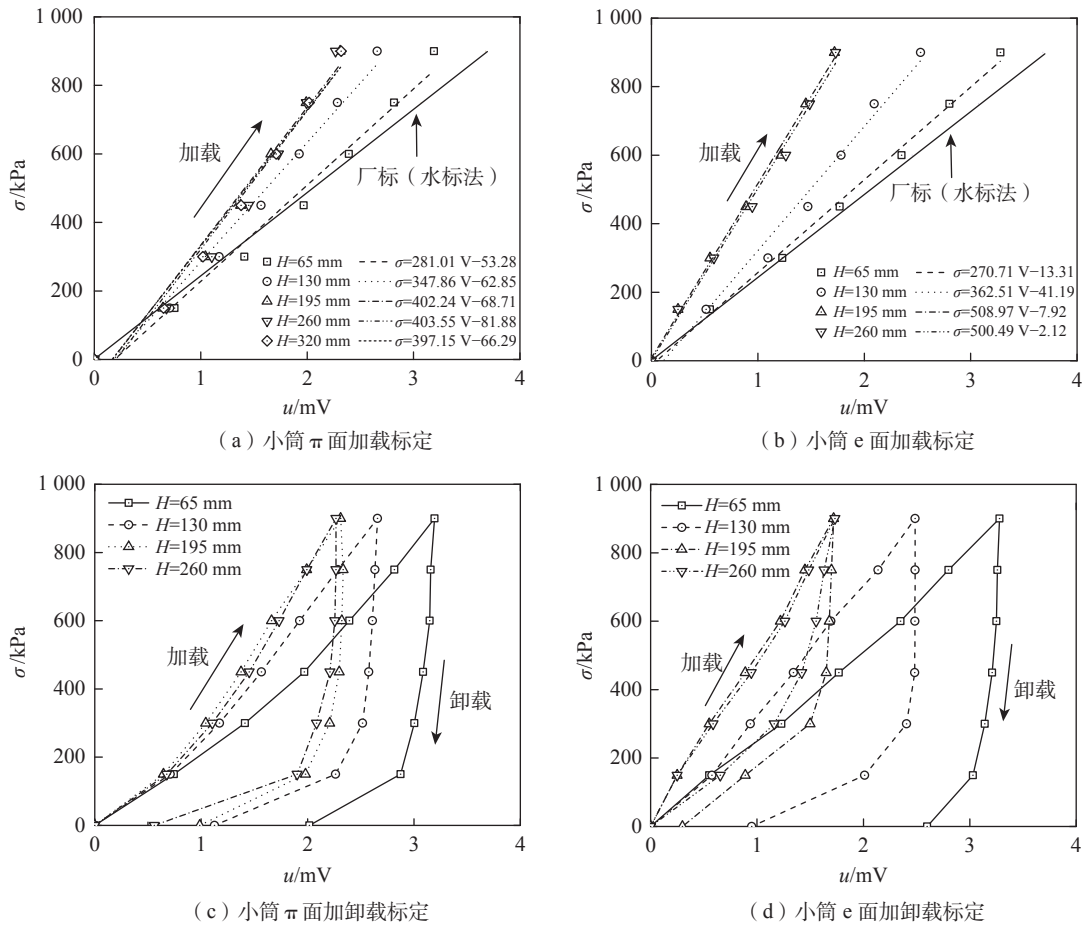


图5 三维土压力盒A小筒标定曲线

Fig. 5 Calibration curve of 3D earth pressure cell A with small cylinder

基本一致,这表明基座的尺寸和传感器的径厚比对标定结果影响较小。

2.3 三维土压力盒量程和加卸载效应

为确定土体应力测试的三维土压力盒量程如何选择以及加卸载条件下的土压力测试效应,选用表1中量程分别为1.0, 3.0 MPa的三维土压力盒B和D进行大筒加卸载标定试验,三维土压力盒的埋深均为300 mm。两个三维土压力盒的 π 面水压标定系数分别为244.6, 633.8 kPa/mV。

图7为三维土压力盒B和D的 π 面大筒标定试验加卸载曲线。

1) 在加载阶段 $L_1 \sim L_6$,量程为1.0 MPa的三维土压力盒B在加载初期的应力和输出电压表现为曲线关系,后期变为直线,采用单一的直线斜率作为加载标定系数会引起测量误差,而量程为3.0 MPa三维土压力盒D在加载阶段中始终表现为直线。因此,在量程不引起较大误差条件下,应选择大量程的三维土压力盒进行土体应力测试。

2) 在卸载阶段(U)不同量程的三维土压力盒均表现出明显的滞后效应,1.0 MPa的三维土压力盒B在完全卸载初期随着加载应力的减少,电压降低的不明显,而3.0 MPa的三维土压力盒D在完全卸载初期电压的变化更为明显。因此,大量程的三维土压力盒滞后性比小量程的三维土压力盒小。同时,量程为1.0 MPa的三维土压力盒在完全卸载后其电压仍高于其初始值0;而量程为3.0 MPa的三维土压力盒几乎恢复到了初始值0。这种滞后效应是水压标定无法反映的,主要是由于薄膜式三维土压力盒与土体之间的相互作用,在卸载条件下表现出的土拱效应,尽管荷载卸载到零,但传感器薄膜由于土拱效应无法返回到零应变。对于大量程传感器,由于薄膜厚度大、刚度高,一定程度上抵消了三维土压力盒周边的土拱效应。因此,当土体经历加卸载过程时,需要选用大量程三维土压力盒才能准确测定土体应力。

3) 量程为1.0 MPa三维土压力盒B的再加载曲线(R_n)均在加载曲线(L_n)和卸载曲线(U_n)中间, $n=1 \sim$

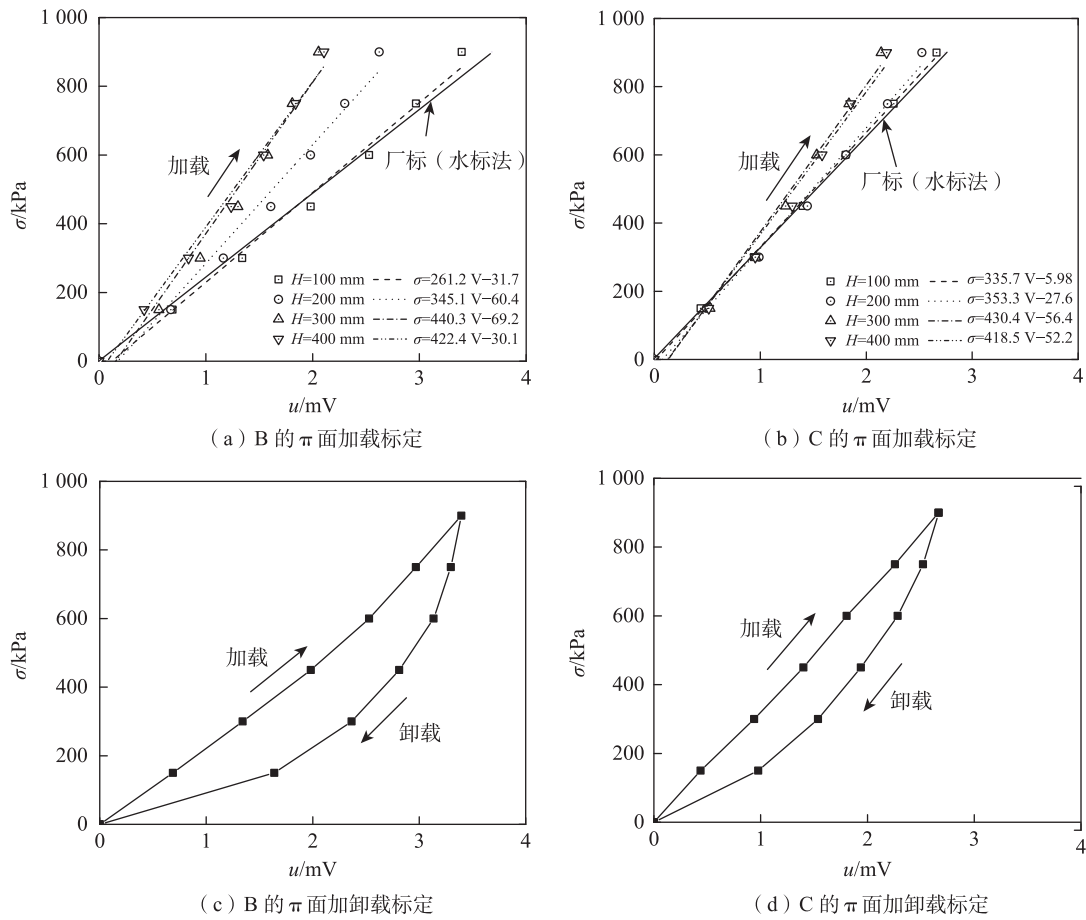
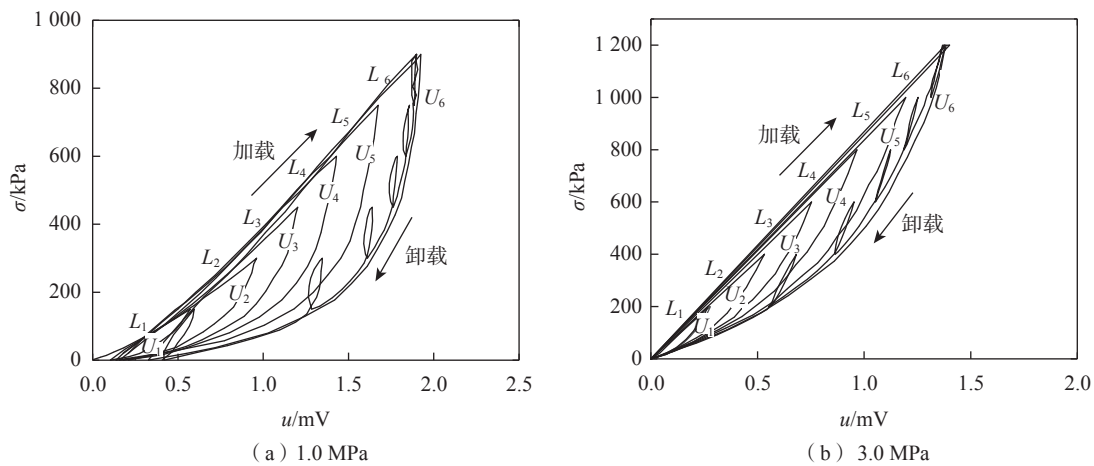


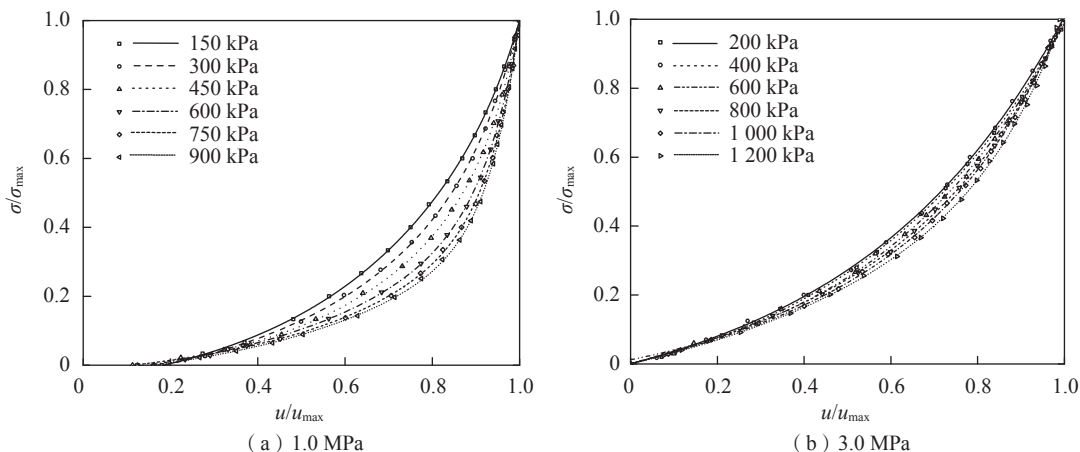
图6 不同基座尺寸三维土压力盒B和C大筒标定

Fig. 6 Calibration curves of 3D earth pressure cells B and C with big cylinder in different sensor size

图7 不同量程三维土压力盒 π 面标定加载卸载曲线Fig. 7 The π plane calibration loading and unloading curves of 3D earth pressure cell with different ranges

6;并在达到上一级加载过程的最大应力后进入下一段加载曲线(L_n)。而3.0 MPa三维土压力盒D的再加载曲线与加载曲线几乎重合。三维土压力盒量程越大,卸载再加载形成的滞回环越小并且逐级卸载过程中的卸载曲线与上一级卸载曲线越接近。

4) 不同量程三维土压力盒的卸载曲线与应力加载历史有关,特别是与卸载前最大加载应力有关。将三维土压力盒B和D的各卸载分支曲线采用卸载前最大应力 $\sigma_{\max}$ 和最大输出电压值 $u_{\max}$ 进行归一化,并绘制了归一化卸载曲线如图8所示。

图8 不同量程三维土压力盒 π 面卸载归一化曲线Fig. 8 The π plane calibration normalized unloading curves of 3D earth pressure cell with different ranges

量程为3.0 MPa的三维土压力盒D的归一化卸载曲线弯曲度小、不同卸载曲线分布带宽小,而1.0 MPa量程的三维土压力盒B的归一化卸载曲线弯曲度大、不同卸载曲线分布带宽大。并且所有归一化卸载曲线可采用下式进行拟合

$$\sigma/\sigma_{\max} = y_0 + A_1 e^{(u/u_{\max} - x_0)/t_1} + A_2 e^{(u/u_{\max} - x_0)/t_2}$$

式中: y_0 , A_1 , A_2 , t_1 , t_2 , x_0 为不同量程三维土压力盒、各卸载曲线的6个待定系数。

如三维土压力盒D第1条卸载曲线对应的最大卸载 $\sigma_{\max} = 200$ kPa, $y_0 = -0.15$, $A_1 = 1.98$, $A_2 = 1.53$, $t_1 = 0.483$, $t_2 = 0.518$ 。值得说明的是,针对3.0 MPa的三维土压力盒D,可采用一条统一的归一化卸载曲线确定卸载条件下的土体应力,但1.0 MPa的三维土压力盒必须采用不同的归一化卸载曲线。因此,建议采用3.0 MPa甚至更大量程的三维土压力盒对土体应力进行测定,特别是存在卸载条件的情况。

3 结论

1) 标定筒的尺寸对标定结果有较大影响,小标定筒具有更强的土拱效应。对三维土压力盒需要选用大标定筒进行标定,降低标定筒尺寸对三维土压力盒标定结果的影响。

2) 三维土压力盒的埋深对砂土标定结果影响很大。埋深小于100 mm时,三维土压力盒加载砂标系数接近水压标定系数;随着埋深的增大,三维土压力盒与砂土的相互作用增强,砂标系数远大于水压标定系数。当埋深大于13~15 d_c 后,砂标系数趋于稳定,不受加载边界影响,可作为三维土压力

盒测定砂土应力的实际标定系数。

3) 不同基座尺寸和传感器径厚比(或三维土压力盒刚度)的三维土压力盒在不同深度下的加载标定曲线其变化规律基本一致,在深度为100 mm时,加载砂标系数接近水压标定系数。在埋深达到300 mm(11~15 d_c)以后,加载砂标系数趋于稳定;在卸载条件下,两者滞回环的大小基本一致,对标定结果影响较小。

4) 量程为1.0 MPa的三维土压力盒在加载初期的应力和输出电压表现为曲线关系,而3.0 MPa的三维土压力盒加载标定曲线始终为直线,采用小量程三维土压力盒的加载标定曲线会导致测量误差。

5) 大量程的三维土压力盒滞后性比小量程的三维土压力盒小。

6) 三维土压力盒的卸载曲线可采用卸载前最大的应力和输出电压值进行归一化处理。

参考文献:

- [1] JARDINE R, ZHU B T, FORAY P, et al. Experimental arrangements for investigation of soil stresses developed around a displacement pile[J]. Soils and Foundations, 2009, 49(5): 661-673.
- [2] 柳伟, 朱怀龙. 砂土介质中薄膜压力传感器的标定试验研究[J]. 中国建材科技, 2022, 31(6): 87-90.
LIU W, ZHU H L. Study on the calibration of thin film pressure sensors in sandy soil[J]. China Building Materials Science & Technology, 2022, 31(6): 87-90.
- [3] 朱怀龙, 黄春梅. 薄膜压力传感器在打桩试验中的标定研究[J]. 铁道建筑技术, 2023(5): 17-20.
ZHU H L, HUANG C M. Experimental study on the calibration of thin film pressure sensors in pile driving tests

- [J]. Railway Construction Technology, 2023(5): 17-20.
- [4] ZHU B T, JARDINE R, FORAY P. The use of miniature soil stress measuring cells in laboratory applications involving stress reversals[J]. Soils and Foundations, 2009, 49(5): 675-688.
- [5] 李春林, 陈青春, 丁启朔. 用于土壤压实监测的土压力传感器标定[J]. 实验技术与管理, 2010, 27(4): 63-66.
LI C L, CHEN Q C, DING Q S. Calibration of soil pressure sensors for soil compaction monitoring[J]. Experimental Technology and Management, 2010, 27(4): 63-66.
- [6] 曾辉, 余尚江. 岩土压力传感器匹配误差的计算[J]. 岩土力学, 2001, 21(1): 99-105.
ZENG H, YU S J. The calculation of matching error of rock-soil pressure transducer[J]. Rock and Soil Mechanics, 2001, 21(1): 99-105.
- [7] 王辉, 杨厥葆, 徐孟龙, 等. 土压力盒在机制砂中的测试误差分析试验研究[J]. 河南城建学院学报, 2018, 27(1): 68-73.
WANG H, YANG A B, XU M L, et al. Test and study on test error of soil pressure box in mechanism sand[J]. Journal of Henan University of Urban Construction, 2018, 27(1): 68-73.
- [8] 芮瑞, 吴端正, 胡港, 等. 模型试验中膜式土压力盒标定及其应用[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(5): 837-845.
RUI R, WU D Z, HU G, et al. Calibration tests on diaphragm-type pressure cells[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(5): 837-845.
- [9] 李顺群, 夏锦红, 王杏杏. 一种三维土压力盒的工作原理及其应用[J]. 岩土力学, 2016, 37(S2): 337-342, 348.
LI S Q, XIA J H, WANG X X. Principle and its application of a three-dimensional earth pressure cell[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(S2): 337-342, 348.
- [10] 李顺群, 陈之祥, 桂超, 等. 一类三维土压力盒的设计及试验验证[J]. 中国公路学报, 2018, 31(1): 11-19.
LI S Q, CHEN Z X, GUI C, et al. Design and experimental verification of a kind of three-dimensional earth pressure cells[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(1): 11-19.
- [11] 陈之祥, 邵龙潭, 李顺群, 等. 三维真土压力盒的设计与应力参数的计算[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(11): 2138-2145.
CHEN Z X, SHAO L T, LI S Q, et al. Design of three-dimensional true earth pressure sensor and calculation of stress parameters[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(11): 2138-2145.
- [12] 陈立航, 李顺群. 用水压标定应变式微型土压力盒的过程与分析[J]. 河北水利电力学院学报, 2020, 30(2): 14-17, 22.
CHEN L H, LI S Q. Process and analysis of strain-type miniature earth pressure box by hydrostatic calibration[J]. Journal of Hebei University of Water Resources and Electric Engineering, 2020, 30(2): 14-17, 22.
- [13] 黄翔宇, 李顺群, 方大转, 等. 三维土压力盒在原位碾压试验中的应用研究[J]. 辽宁工业大学学报(自然科学版), 2022, 42(3): 189-192.
HUANG X Y, LI S Q, FANG D Z, et al. Application research on three-dimensional earth pressure cell in situ rolling test[J]. Journal of Liaoning University of Technology (Natural Science Edition), 2022, 42(3): 189-192.
- [14] 程宇, 李顺群, 夏锦红. 三维土压力盒在某模型试验中的应用研究[J]. 河南城建学院学报, 2018, 27(3): 38-41.
CHENG Y, LI S Q, XIA J H. Application study of three-dimensional earth pressure cell in a model tests[J]. Journal of Henan University of Urban Construction, 2018, 27(3): 38-41.
- [15] 史玉龙, 张四化, 郝艳波, 等. 尺寸效应对砂土标定土压力盒匹配系数的影响研究[J]. 工程勘察, 2022, 50(12): 1-5.
SHI Y L, ZHANG S H, HAO Y B, et al. Influence of size effects on matching factor of earth pressure cell in sand calibration tests[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2022, 50(12): 1-5.



第一作者: 蔡仙发(1971—), 高级工程师, 研究方向为岩土工程。E-mail: 442438829@qq.com。



通信作者: 朱碧堂(1974—), 教授, 博士, 博士生导师, 研究方向为隧道与岩土工程。E-mail: btangzh@ecjtu.edu.cn。

(责任编辑: 姜红贵)